mgr inż. Ewelina Fabiańczyk*
mgr inż. Bogumiła Pałac-Walko*

Recenzent: dr hab. inż. Witold Pytel

Badania skał w prawdziwie trójosiowym stanie naprężenia

Słowa kluczowe: prawdziwie trójosiowy stan naprężeń skała anizotropowa, łupek Chichibu naprężenia pośrednie, płaszczyzna foliacji

Streszczenie
Dokonano przeglądu literatury związanej z tematyką badań skał w warunkach prawdziwie trójosiowego stanu naprężeń ściskających. Wskazano na istotne znaczenie tego rodzaju badań dla przypadku anizotropii materiałów.

1. Wprowadzenie

Analizując zachowanie się górotworu naruszonego prowadzonymi pracami górniczymi można zauważyć generalny wzrost wartości naprężeń i odkształceń wokół wyrobisk, a także znaczące zmiany w proporcjach pomiędzy składowymi tensora stanu naprężenia reprezentującego ciśnienie działające na górotwór, który najogólniej poddany jest złożonemu, przestrzennemu stanowi naprężenia. Wraz ze wzrostem głębokości eksploatacji szczególnego znaczenia nabiera wiedza o własnościach mechanicznych skał znajdujących się w trójosiowym stanie naprężeń ściskających [2], a także znajomość technicznych (laboratoryjnych lub dołowych) sposobów wyznaczania charakterystyk materiałowych próbek skalnych pracujących w prawdziwie trójosiowym stanie naprężenia ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$), gdzie σ_1, σ_2, σ_3 – naprężenia główne.
W praktyce badań laboratoryjnych na maszynie wytrzymałościowej realizowane są dwa warianty tego stanu:

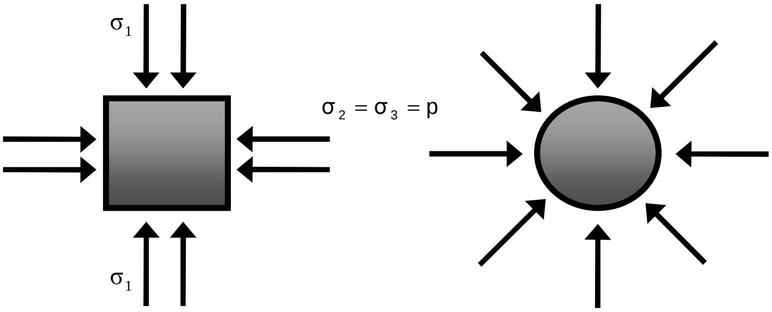
– osiowo-symetryczny stan naprężenia – zasada Karmana $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$,
– pełny trójosiowy stan naprężenia $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$.

Zasada Karmana przyjmuje, że kierunek działania większego naprężenia głównego σ_1, reprezentującego nacisk tłoka maszyny wytrzymałościowej, jest równoległy do podłużnej (pionowej) osi próbki skalnej, natomiast naprężenie obwodowe $\sigma_2 = \sigma_3$ działa na próbkę w kierunku radialnym (rys. 1) Założenie to sprowadza zagadnienie do zadania osiowo-symetrycznego,

* Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Plac Teatralny 2, 50-051 Wrocław

a więc w zasadzie do modelu dwuwymiarowego i realizowane jest w większości laboratoriów mechaniki skał [5].

Wyniki wieloletnich badań wytrzymałościowych skał [6,2] pozwoliły stwierdzić, że w górotworze nienaruszonym robotami górniczymi czy budowlanymi, w przypowierzchniowych partiach skorupy ziemskiej, spełnione są warunki Karmana. Jednak może się zdarzyć, że w głęboko zalegających warstwach pośrednie naprężenie σ_2 jest kilkakrotnie większe od σ_3, uważanego za najmniejsze naprężenie. Można zatem wnioskować, że zasada Karmana niekoniecznie odpowiada ogólnym warunkom obciążenia ośrodka skalnego w warunkach rzeczywistych.



Rys. 1. Obciążanie próbki w osiowo symetrycznym stanie naprężenia wg zasady Karmana

2. Prawdziwie trójosiowy stan naprężenia (True Triaxial Compression – TTC)

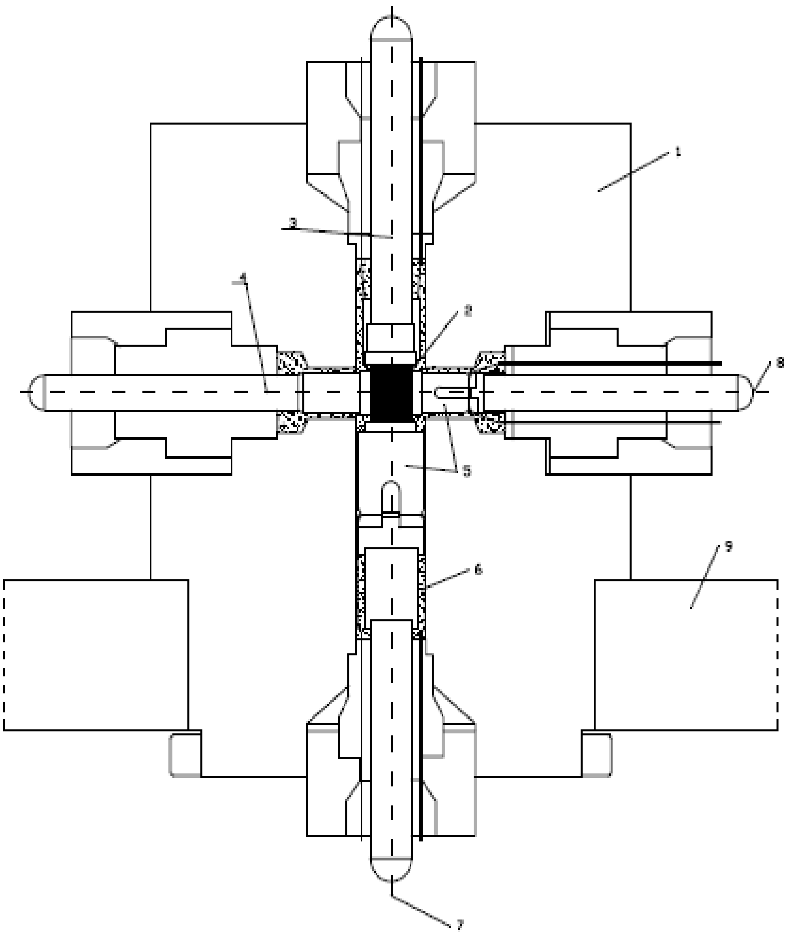
Ponieważ badania zachowania się skał pozostających w tzw. prawdziwie trójosiowym stanie naprężenia $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ są w realizacji zdecydowanie trudniejsze technicznie niż badania standardowe wykorzystujące zasadę Karmana, ilość danych literaturowych i publikacji naukowych poświęconych temu zagadnieniu jest niezbyt duża [3,4].

Laboratoryjne próby, pozwalające odwzorować prawdziwe warunki obciążeniowe pracy górotworu, możliwe są do zrealizowania tylko przy wykorzystaniu do tego celu specjalistycznej i unikalnej aparatury, której konstrukcja umożliwia fizyczne poddanie próbek skalnych obciążeniu o zróżnicowanych składowych w trzech dowolnych kierunkach [1]. Ogólnie wiadomo, że zgodnie z hipotezą Coulomba-Mohra naprężenie pośrednie σ_2 nie ma wpływu na wytrzymałość skał izotropowych. Jednak w latach 60-tych Murrell (1963) i Mogi (1967) wykazali, że istotny wpływ na wytrzymałość próbek skał anizotropowych wywierają naprężenia pośrednie σ_2. Żeby wytworzyć w badanej próbce skalnej ogólny trójosiowy stan naprężenia ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$) dobierano kształt próbek oraz sposób obciążenia próbek [2,4].

Na przykład w próbkach w postaci rury grubościennej jest względna łatwość wytworzenia dowolnego prawdziwie trójosiowego stanu naprężenia,

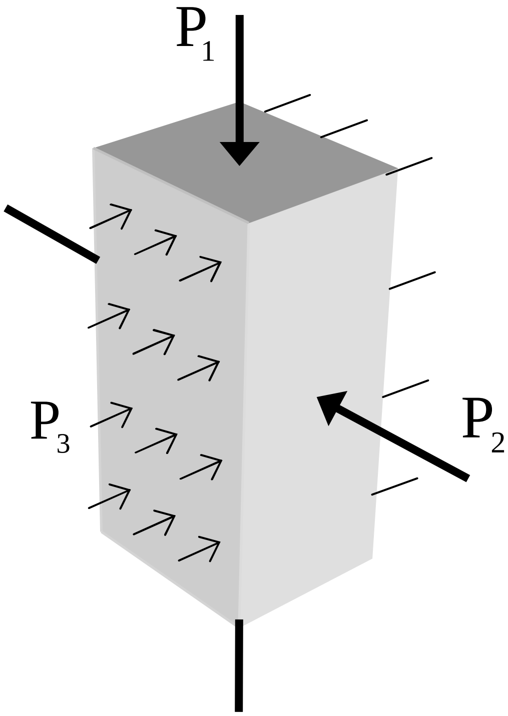
bądź też uzyskania wartości ujemnych (rozciągających) najmniejszych naprężeń σ_3. Taki stan otrzymujemy poprzez manipulowanie wartościami obciążenia pionowego, ciśnienia otaczającego zewnętrznego i wewnętrznego i/lub momentu skręcającego. Ogólny trójosiowy stan naprężenia możemy uzyskać również w próbkach sześciennych lub walcowych (metoda brazylijska).

K. Mogi z Uniwersytetu Tokijskiego był prekursorem odnośnie badań nad zmianami odkształcenia objętościowego i dylatancji skał w warunkach TTC [4]. Schemat komory trójosiowej aparatu Mogiego przeznaczonego do badań prostopadłościennych próbek skalnych w prawdziwie trójosiowym stanie naprężeń ściskających przedstawiono na rys. 2, natomiast sposoby obciążania próbek rys. 3.



1 – korpus komory, 2 – próba poddawana badaniu, 3 – pionowy tłok oporowy, 4 – poziomy tłok oporowy, 5 – siłomierze elektrooporowe, 6 – olej silikonowy, 7 i 8 – siłowniki hydrauliczne, 9 – płyta nośna aparatu [6]

Rys. 2. Schemat aparatu Mogiego stosowany do badania prostopadłościennych próbek skalnych w prawdziwie trójosiowym stanie naprężeń ściskających



Rys. 3. Sposób obciążania próbki kostkowej podczas badania w prawdziwie trójosiowym stanie naprężeń ściskających

W aparacie trójosiowym większe naprężenia pionowe σ_1 oraz pośrednie naprężenia σ_2 generowane są przy pomocy sztywnych tłoków, natomiast najmniejsze naprężenia σ_3 wywoływane są poprzez odpowiednie sterowanie wartością ciśnienia oleju p_3 [4].

3. Badanie TTC

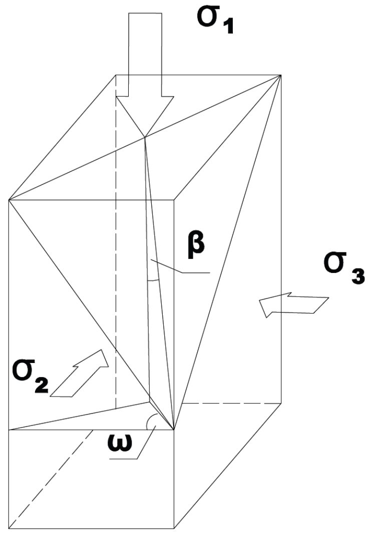
Dotychczas laboratoryjne badania eksperymentalne wykonywano zazwyczaj z użyciem próbek walcowych. Próbki o takim kształcie badano w osiowo-symetrycznym stanie naprężenia $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ spełniającym zasadę Karamana. Wyniki badań próbek anizotropowych wytrzymałościowo badane w tym stanie jest trudno opracować w zakresie przyjętej hipotezy.

Ogólnie wiadomo, że czynnikiem mającym istotny wpływ na geometrię deformacji (sposób deformacji) ma anizotropia sprężysta i wytrzymałościowa. Profesor Marek Kwaśniewski omówił w swojej pracy wyniki badań TTC wykonanych na aparacie profesora K. Mogiego, których celem było poznanie wpływu pośredniego naprężenia głównego (σ_2) na własności i zachowanie się skał anizotropowych. Badaniu TTC poddano prostopadłościenne

próbki łupka krystalicznego. Badane próbki były różnie zorientowane pod względem kierunków przyłożonych ściskających naprężeń głównych $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ [2].

Przedmiot badań stanowiła skała pochodząca z Chichibu (Japonia) w postaci jednorodnego zielonego łupka krystalicznego o wyraźnej i gęstej foliacji. Próbki przygotowano tak, aby można było wykonać badania dla czterech różnych orientacji przestrzennych działania naprężeń głównych σ_1, σ_2 i σ_3 względem płaszczyzn foliacji (rys. 4) [2].

W badaniu zastosowano aparat umożliwiający obciążanie prostopadłościennych próbek skalnych w warunkach ogólnego trójosiowego jednorodnego stanu naprężeń ściskających [6]. Poddane badaniom próbki obciążano w kierunku pionowym (σ_1), w jednym z kierunków poziomych (σ_2) poprzez tłoki napędzane ręcznymi pompami hydraulicznymi.



Rys. 4. Schemat rozmieszczenia kątów β i ω na próbce, gdzie płaszczyzna foliacji wynosi 45º [2]

Do obu końców próbki za pomocą kleju epoksydowego Araldite (CIBA) przyklejono walcowe krążki o następujących parametrach: grubość około 15 mm i średnica 25 mm i 30 mm. Podkładki (krążki) te wykonano z ulepszonej cieplnie stali narzędziowej, a ich zastosowanie miało na celu nadanie równomiernego obciążenia pionowego na próbkę. Natomiast działające w kierunku naprężenia pośredniego σ_2 obciążenie poziome zadano poprzez prostopadłościenne podkładki stalowe o wymiarach: 26,5-28 mm × 16,5-22 mm × 12 mm. Pomiędzy każdą z podkładek wprowadzono pasek cienkiego teflonu w celu wyeliminowania tarcia. Ścianki badanej próbki zabezpieczono cienką (0,03 mm) folią miedzianą, aby zapobiec penetracji te-

flonu do skały przy dużych obciążeniach. Poza tym do ścianek przymocowano tensometry elektrooporowe (typ KFC-10-C1-11, dl. 10 mm, oporność 120 Ω) służące do pomiaru odkształceń próbki. Rozmieszczenie tensometrów na ściankach próbki uzależniono od orientacji naprężenia pośredniego i najmniejszego naprężenia względem płaszczyzn foliacji. Tensometry elektrooporowe wykorzystano do pomiaru odkształceń podłużnych w stadium poprzedzającym zniszczenie próbki, natomiast odkształcenia próbki w stanie pokrytycznym oznaczono na podstawie prowadzonego równocześnie pomiaru przemieszczenia pionowego tłoka. Wszystkie odsłonięte miejsca próbki oraz jej ścianki wystawione na działanie ciśnienia okólnego pokryto warstwą kilkumilimetrowego kauczuku silikonowego. Warstwa ta tworząc szczelną osłonkę chroni przed penetracją cieczy. Wyniki skorygowano o oznaczone wcześniej wartości odkształceń tłoka, dynamometru i podkładek próbki.

Badania w TTC wykonano przy naprężeniach najmniejszych (σ_3) równych 50 MPa natomiast naprężenia pośrednie σ_2 zależne były od orientacji β i ω danej próbki, zaś σ_1 były zmienne i zwiększane stopniowo.

Należy zauważyć, że próbki te ulegały zniszczeniu poprzez ścięcie i poślizg w płaszczyznach uwarstwienia (foliacji). A więc dla orientacji $\beta/\omega = 30^o/0^o$, $30^o/45^o$, $30^o/90^o$ wartość kąta β równa się wartości kąta zniszczenia θ.

Podczas badania jednej z próbek zauważono, że uległa ona bardzo kruchemu i gwałtownemu zniszczeniu w pojedynczej płaszczyźnie [2].

4. Podsumowanie

Na podstawie opisanych badań na próbkach łupku Chichibu uwzględniających prawdziwie trójosiowy stan naprężeń ściskających stwierdzono, że w ośrodkach skalnych zniszczenia najczęściej powstają przez ścięcie wzdłuż płaszczyzn foliacji równoległych do kierunku głównego naprężenia pośredniego (w przeciwieństwie do izotropowych ośrodków skalnych).

Ponieważ sól charakteryzuje się znaczną jednorodnością i wysoką izotropowością badania wytrzymałościowe przeprowadzane są zwykle z użyciem konwencjonalnego aparatu trójosiowego ściskania. Dodatkowo dla soli wykonuje się próby pełzania w jednoosiowym i w osiowo symetrycznym (trójosiowym) stanie naprężenia. Planowane badania sieroszowickiej soli kamiennej w prawdziwie trójosiowym stanie naprężenia mogą pozwolić na wyjaśnienie zagadnienia, czy cechy lepkie soli sieroszowickiej wykazują izotropowość.

Badania TTC wykonywane są jednak sporadycznie ze względu na ich wysoki koszt oraz ograniczoną dostępność aparatury.

Uwagi końcowe

Dziękujemy Panu prof. Markowi Kwaśniewskiemu za udostępnienie wyników badań i materiałów niezbędnych do napisania tego artykułu.
Niniejsza praca powstała w ramach działalności statutowej finansowanej w 2010 r. przez Instytut Górnictwa Politechniki Wrocławskiej jako część zadania badawczego pt. „Odporność obiektów magazynowych w masywie solnym LGOM na zagrożenia generowane działalnością górniczą i naturalnymi procesami tektonicznymi.”

Literatura

[1] Cristescu N.D., Hunsche U., 1997, Time Effects in Rock Mechanics, Wilay, Chichester.
[2] Kwaśniewski M., 2002, Zachowanie się skał izo- i anizotropowych w warunkach trójosiowego ściskania, Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej, Gliwice.
[3] Kwaśniewski M., Takahashi M., 2006, Behavior of a sandstone under axi- and asimetric compressive stress conditions, Rock Mechanics Symposium, Singapore.
[4] Kwaśniewski M., 2007, Mechanical behaviour of rocks under true traxial compression conditions – volumetric strain and dilatancy, Arch. Min. Sci., Vol. 52, No 3, p. 409-435.
[5] Lis J., Kijewski P., 2007, Badania własności wytrzymałościowych i odkształceniowych skał z kopalni LGOM w trójosiowym stanie naprężeń, Czas. Nauk.-Techn. Górnictwa Rud CUPRUM, nr 4 (45), str. 17-40, Wydawnictwo KGHM CUPRUM CBR, Wrocław.
[6] Mogi K., 2006, Experimental Rock Mechanics. Taylor & Francis/Balkema, Leiden.

Rock tests under true triaxial compression conditions

Key words: true triaxial compression, anisotropic rock, Chichibu shale, intermediate stress, foliation plane

The paper is based on the review of literature referring to the issue of rock tests under true triaxial compressive stress conditions. Significant meaning of such tests for materials' anisotropy was indicated.